

Évaluation de l'applicabilité d'une méthode statistique aux variations saisonnières des relations concentration-débit sur un petit cours d'eau

Evaluation of the applicability of a statistical technique for determining seasonal variations in concentration-discharge relations in a small stream

A. St-Hilaire, D. Caissie, N. El-Jabi et G. Morin

Volume 11, numéro 2, 1998

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705302ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705302ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

St-Hilaire, A., Caissie, D., El-Jabi, N. & Morin, G. (1998). Évaluation de l'applicabilité d'une méthode statistique aux variations saisonnières des relations concentration-débit sur un petit cours d'eau. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 11(2), 175–190. <https://doi.org/10.7202/705302ar>

Résumé de l'article

Les paramètres chimiques jouent un rôle important dans l'équilibre des écosystèmes aquatiques. De nombreuses études ont déjà démontré que les caractéristiques chimiques d'un cours d'eau peuvent changer avec les saisons. Cette étude a pour but de revoir les relations débit-concentration sur un petit cours d'eau, dans le contexte des variations entre deux périodes climatiques. Pour ce faire, une analyse de régression entre le débit et six paramètres de qualité de l'eau (sodium, magnésium, conductivité, pH, azote total et le carbone organique dissous) provenant d'un petit bassin versant forestier (ruisseau Catamaran, N.-B., Canada) a été réalisée afin de déterminer la différence entre la saison sans glace et la saison avec glace. Des échantillons mensuels d'eau ont été récoltés sur le ruisseau Catamaran depuis 1990. Les analyses chimiques faites sur ses échantillons ont permis de déterminer les concentrations des paramètres étudiés. La plupart des variables de qualité ont démontré une relation significative avec le débit, sauf l'azote total. Les coefficients de détermination variaient entre 0.752 et 0.898, exception faite du carbone organique dissous dont le r^2 était de 0.294. La conductivité était le paramètre dont le débit expliquait le plus la variance. Une étude des rapports des sommes des carrés des résidus a permis de déterminer que seul le pH requiert un modèle différent pour la période sans glace et la saison avec glace.

Les variations saisonnières de la relation débit-pH revêt une importance significative pour les ruisseaux comme celui de Catamaran, qui incluent de nombreux habitats pour le saumon de l'Atlantique. Les résultats des analyses de régressions indiquent que lorsque la géochimie est plus complexe, comme c'est le cas pour le pH, il faut diviser les séries temporelles en sous-composantes saisonnières avant de tenter d'établir une relation débit-concentration.

Évaluation de l'applicabilité d'une méthode statistique aux variations saisonnières des relations concentration-débit sur un petit cours d'eau

Evaluation of the applicability of a statistical technique for determining seasonal variations in concentration-discharge relations in a small watercourse

A. ST-HILAIRE¹, D. CAISSIE², N. EL-JABI³ et G. MORIN^{1*}

Reçu le 18 juillet 1996, accepté le 12 janvier 1998**.

SUMMARY

The chemical composition of water is of great importance to ecosystem and in habitat management. Many studies have already shown that the chemical characteristics of a stream change with seasons. These variations have a strong impact on the ecosystem, especially on fish populations. The objective of this study is to quantify the relationship between the logarithm of discharge and six water quality parameters (sodium, magnesium, conductivity, pH, dissolved organic carbon and total nitrogen) for a small forested catchment (Catamaran Brook, N.B., Canada) and to verify the importance of seasonality. Monthly water samples have been gathered at Catamaran Brook since 1990. Detailed water chemistry performed on these samples provided a data base for this project. Various linear regression models were tested to verify if regressions were required for the winter season. The criterion used was the ratio of the squared sum of residuals for each data set, which follows a Fisher distribution. Of the six water quality parameters, all except total nitrogen showed a significant relationship with discharge. On an annual basis, the coefficient of determination (r^2) varied between 0.752 and 0.898, except for dissolved organic carbon which showed a r^2 of 0.294. Of the studied parameters, conductivity was the parameter for which discharge explained the most variance. Ratios of the squared sum of residuals were analyzed to verify the need for different regression models for the ice-covered and ice-free seasons. Only streamwater pH required 2 different models. This is of specific importance and interest because of an important salmon population in Catamaran Brook. Other researchers have shown that salmonids can be negatively impacted by pH depressions during snowmelt events. These results show that most dissolved ions which follow simple geochemical reactions can be modelled year-round with only one

1. INRS-EAU, C.P. 7500, Suite 105, Ste-Foy, Qc. G1V 4C7, Canada.

2. Ministère de Pêches et Océans du Canada, C.P. 5030, Moncton, N.-B., Canada, E1C 9B6.

3. École de Génie, Université de Moncton, Moncton, N.-B. Canada, E1A 3E9.

* Correspondance. e-mail : guy_morin@inrs-eau.quebec.ca.

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 31 décembre 1998.

linear regression. When the geochemistry is more complex, such as in the case of pH, linear regression models can sometimes be used, provided that the annual time-series is divided into seasons with relatively homogenous hydrological and geochemical functions.

Key-words: *water chemistry, small stream, season, regression analysis.*

RÉSUMÉ

Les paramètres chimiques jouent un rôle important dans l'équilibre des écosystèmes aquatiques. De nombreuses études ont déjà démontré que les caractéristiques chimiques d'un cours d'eau peuvent changer avec les saisons. Cette étude a pour but de revoir les relations débit-concentration sur un petit cours d'eau, dans le contexte des variations entre deux périodes climatiques. Pour ce faire, une analyse de régression entre le débit et six paramètres de qualité de d'eau (sodium, magnésium, conductivité, pH, azote total et le carbone organique dissous) provenant d'un petit bassin versant forestier (ruisseau Catamaran, N.-B., Canada) a été réalisée afin de déterminer la différence entre la saison sans glace et la saison avec glace. Des échantillons mensuels d'eau ont été récoltés sur le ruisseau Catamaran depuis 1990. Les analyses chimiques faites sur ses échantillons ont permis de déterminer les concentrations des paramètres étudiés. La plupart des variables de qualité ont démontré une relation significative avec le débit, sauf l'azote total. Les coefficients de détermination variaient entre 0,752 et 0,898, exception faite du carbone organique dissous dont le r^2 était de 0,294. La conductivité était le paramètre dont le débit expliquait le plus la variance. Une étude des rapports des sommes des carrés des résidus a permis de déterminer que seul le pH requiert un modèle différent pour la période sans glace et la saison avec glace. Les variations saisonnières de la relation débit-pH revêtent une importance significative pour les ruisseaux comme celui de Catamaran, qui incluent de nombreux habitats pour le saumon de l'Atlantique. Les résultats des analyses de régressions indiquent que lorsque la géochimie est plus complexe, comme c'est le cas pour le pH, il faut diviser les séries temporelles en sous-composantes saisonnières avant de tenter d'établir une relation débit-concentration.

Mots clés : *qualité de l'eau, petit cours d'eau, saison, analyse de régression.*

1 – INTRODUCTION

La composition chimique des eaux est très importante pour les différentes espèces végétales et animales des écosystèmes aquatiques. Elle est souvent associée à l'analyse quantitative en rivière afin de mieux comprendre l'effet du débit sur les concentrations. Bon nombre de modèles de simulation et de prédiction de paramètres chimiques ont comme base un modèle hydrologique servant à simuler le débit (modèle CEQUEAU, MORIN et PAQUET, 1995 et modèle BIRKENESS, CHRISTOPHERSEN et NEAL, 1990). La composante qualitative de ces modèles est basée sur le principe de la conservation de la masse et prédit les concentrations en fonction de l'effet de dilution du débit. L'application de tels modèles repose donc sur l'hypothèse qu'il existe une relation débit-concentration.

Plusieurs études ont déjà démontré que les caractéristiques chimiques d'un cours d'eau sont différentes l'hiver et l'été (CLUIS *et al.*, 1988, HIRATA et MURAOKA, 1988). Les variations saisonnières de débit ont une influence certaine sur les

concentrations d'ions mesurées dans l'eau. Peu d'études ont pris en considération le changement hydrologique (débit) saisonnier. Dans les régions nordiques, le régime hydrologique des rivières est fortement modulé par les saisons. ASHKAR *et al.* (1993) ont étudié les variations saisonnières des débits de crues au Québec et au Nouveau-Brunswick (Canada). Ils déterminèrent que l'année hydrologique peut se diviser en au moins deux saisons : une humide et une sèche.

Ces variations saisonnières du régime hydrologique peuvent avoir un impact sur la population de poissons. La plus importante avalaison répertoriée en 5 ans d'étude du saumon de l'Atlantique (*Salmo salar*) au ruisseau Catamaran, a produit une densité relativement faible d'alevins l'été suivant. Les étiages sévères de l'hiver ont été cités comme étant une des causes importantes de mortalité (CAISSIE, 1995), mais les variations de qualité de l'eau associées à ces étiages demeurent inconnus. RICE et BRICKER (1995) ont expliqué que de tels changements de régime hydrologique sont causés par une modification saisonnière de l'importance relative des sources de volumes d'eau. Puisque l'importance relative des contributions varie, il est fort probable que certains paramètres chimiques reliés au débit démontrent un changement saisonnier causé par ce changement hydrologique. Il apparaît donc plausible que le régime quantité-qualité de l'eau, modulé par les saisons modifie l'habitat du poisson en conséquence. Par exemple, il a été remarqué que la prépondérance de l'apport de l'écoulement souterrain durant les périodes d'étiage influence la qualité de l'habitat de plusieurs salmonidés (BENSON, 1953 et EDWARDS *et al.*, 1979).

SCHALLOCK et LOTSPEICH (1974) ont étudié la qualité de l'eau de plusieurs rivières en Alaska. En plus d'être caractérisées par des concentrations minimum d'oxygène durant l'hiver, ces rivières ont des niveaux de conductivité et d'alcalinité plus élevées en hiver qu'en été. Dans leur étude sur les variations de qualité d'eau en fonction du débit dans un réseau hydrographique de la Saskatchewan (Canada), ESTERBY et EL-SHAARAWI (1992) ont démontré que la plus grande partie (42 à 79 %) de la variabilité est imputable aux changements saisonniers du régime hydrologique.

Un des exemples les plus frappants est celui de l'acidité (mesuré indirectement par le pH), qui varie différemment pour un débit donné selon qu'il s'agisse des mesures prises en hiver ou en été (WATT, 1986). Les augmentations de débit en hiver sont souvent associées à des périodes de fonte du couvert de neige. Dans certains cas, on peut mesurer un choc acide dû à la fonte de neige accumulée durant l'hiver (CAMPBELL *et al.*, 1992). Ces chocs acides ont des répercussions sur l'écosystème, en particulier sur les salmonidés. HARVEY et WHELPDALE (1986) ont étudié l'augmentation du taux de mortalité des truites arc-en-ciel (*Salmo gairdneri*) causée par des épisodes d'acidification ($\text{pH} < 4$). DALZIEL et BROWN (1986) ont conclu que la mobilisation de l'aluminium causé par un faible pH entraîne une diminution de la concentration des sels dans le plasma de ces poissons.

Il semble donc que la capacité de prédiction des fluctuations de la qualité d'eau en fonction du débit soit de première importance pour la saine gestion de l'écosystème. Le but de cette étude est de démontrer qu'il existe une méthode statistique simple permettant de vérifier si il existe une variation saisonnière de la relation entre le débit et certains paramètres chimiques, et d'appliquer cette technique sur un petit cours d'eau pour les périodes avec et sans couvert de glace. Pour ce faire, une analyse statistique par régressions linéaires entre le débit et les six paramètres chimiques que sont la conductivité (CND), le pH, le magnésium

(Mg^{2+}) l'azote total (N_{tot}), le carbone organique dissous (COD) et le sodium (Na^+), a été effectuée. La présente étude se limite à l'évaluation de l'applicabilité d'une méthode statistique permettant de déterminer un changement de la qualité de l'eau entre les périodes avec et sans glace. L'étude des conséquences de telles variations sur le biote (en particulier sur les salmonidés), nécessite une récolte de données supplémentaire. Au ruisseau Catamaran (site de récolte des données physico-chimiques), les données de densité de poisson sont inexistantes durant la période hivernale. Par contre, une discussion traitant entre autres des implications sur l'habitat aquatique du saumon permettra de voir les applications possibles de cette méthode statistique.

2 – MÉTHODOLOGIE

La fonction mathématique utilisée est de type logarithmique (FELLER et KIMMINS, 1979 ; CAISSIE *et al.*, 1996). Des régressions linéaires entre le logarithme du débit et les paramètres chimiques ont été calculées. Ces régressions ont la forme générale :

$$C = m \text{Log}(Q) + b \quad (1)$$

où :

C : concentration du paramètre chimique (mg L^{-1} ou $\mu\text{S cm}^{-1}$)

Log : logarithme de base 10.

m, b : coefficients de la régression

Q : débit ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

Les régressions linéaires ont été calculées pour l'ensemble des données, ainsi que pour les données récoltées durant les saisons avec et sans glace. Dans le cadre de cette étude, la période hivernale est celle comprenant les mois de l'année durant lesquels un couvert de glace et de neige est susceptible d'exister au ruisseau Catamaran (janvier-avril). Tous les autres échantillons sont considérés comme faisant partie de la saison estivale (sans glace).

L'étape suivante de l'analyse consiste à tester si les différents modèles de régression pour la saison avec et sans glace sont significativement différents du modèle pour la série complète. Statistiquement, l'hypothèse de base (H_0) est simplement une assumption d'égalité des coefficients de régression de l'équation 1 en hiver et en été ($m_{\text{été}} = m_{\text{hiver}}$, $b_{\text{été}} = b_{\text{hiver}}$).

Pour vérifier l'hypothèse de base, il suffit de calculer le rapport entre la somme des carrés des résidus pour un modèle (une seule équation de régression) et la somme des carrés des résidus pour deux modèles. Ce rapport suit une distribution de Fisher selon l'équation suivante (HOLDER, 1985) :

$$F_{p,n-k-1,1-\alpha} \left(\frac{R_H - R}{p} \right) / \left(\frac{R}{n-k-1} \right) \quad (2)$$

où : R_H : somme des carrés des résidus pour une seule régression,

R : somme des carrés des résidus pour deux modèles,

p : nombre de contraintes,

n : nombre d'observations,

k : nombres de paramètres,
F : distribution de Fisher,
 $1 - \alpha$: niveau de confiance.

Lorsque le rapport de l'équation (2) dépasse celui stipulé par la distribution de Fisher ($F_{p,n-k-1,1-\alpha}$) pour un niveau de confiance (α) donné, l'hypothèse nulle est rejetée. Dans la présente étude, le nombre de contraintes (p) est de deux, puisqu'on passe d'un nombre initial de paramètres (k) de quatre ($m1 \neq m2$, $b1 \neq b2$), à deux ($m1 = m2$, $b1 = b2$). Le niveau de confiance ($1 - \alpha$) est de 95 %.

3 – ANALYSE NUMÉRIQUE

Le cours d'eau étudié dans le cadre de cette recherche est le ruisseau Catamaran (figure 1). Ce ruisseau est le site d'un projet de recherche sur l'impact de la coupe forestière sur l'habitat aquatique (CUNJAK *et al.*, 1990) avec une emphase particulière sur l'habitat du saumon de l'Atlantique (*Salmo salar*). Cette espèce de poisson est la plus commune dans ce cours d'eau. L'avalaison des anadromes adultes se fait vers la fin de la période sans glace, soit de la fin octobre à la mi-novembre (CUNJAK *et al.*, 1990).

Situé au centre du Nouveau-Brunswick, le bassin versant du ruisseau Catamaran couvre une superficie de 51 km². Les essences dominantes de ce bassin versant forestier sont les conifères (ST-HILAIRE *et al.*, 1996). Pour cette étude, de nombreux paramètres physiques, chimiques et biologiques sont mesurés, dont les paramètres de quantité et de qualité de l'eau qui ont été utilisés pour les fins de la présente analyse. La précipitation annuelle moyenne sur le bassin est d'environ 1142 mm et la température de l'air (moyenne journalière) varie de - 11,8 °C en janvier à 18,8 °C en juillet (CUNJAK *et al.*, 1993). Les données hydrométriques proviennent d'une station de jaugeage située au milieu du bassin versant et couvrant une superficie de 27 km² (figure 1). Le débit moyen annuel à la station hydrométrique est de 0,686 m³s⁻¹ (CUNJAK *et al.*, 1993). Ce débit représente une lame d'écoulement de 754 mm, correspondant à 66 % de la précipitation annuelle.

Les données de qualité des eaux ont été fournies par Environnement Canada. Ces données proviennent d'un programme d'échantillonnage mensuel en vigueur depuis 1990. Parmi les paramètres chimiques relevés sur le ruisseau Catamaran certains ont un nombre insuffisant de mesures durant la saison avec un couvert de glace et n'ont pu être utilisés. Les paramètres choisis comportant un nombre suffisant de mesures et qui ont été sélectionnés sont : le pH, la conductivité (CND), l'azote total (N_{tot}), le carbone organique dissous (COD), le sodium (Na^+) et le magnésium (Mg^{2+}). Le pH et la conductivité ont été sélectionnés parce que ce sont des paramètres qui peuvent affecter l'habitat sur saumon de l'Atlantique. La quantité d'ions H^+ dans l'eau peut provoquer une plus ou moins grande mobilisation de l'aluminium toxique pour les saumons. Des études ont démontré qu'un pH faible peut causer un déséquilibre électrolytique dans les ouïes des poissons et une augmentation de l'activité métabolique (DOCKRAY *et al.*, 1996). Les variations de conductivité peuvent affecter l'osmorégulation des poissons (CAMPBELL *et al.*, 1992). Le COD et le N_{tot} ont été choisis parce que ce sont des variables

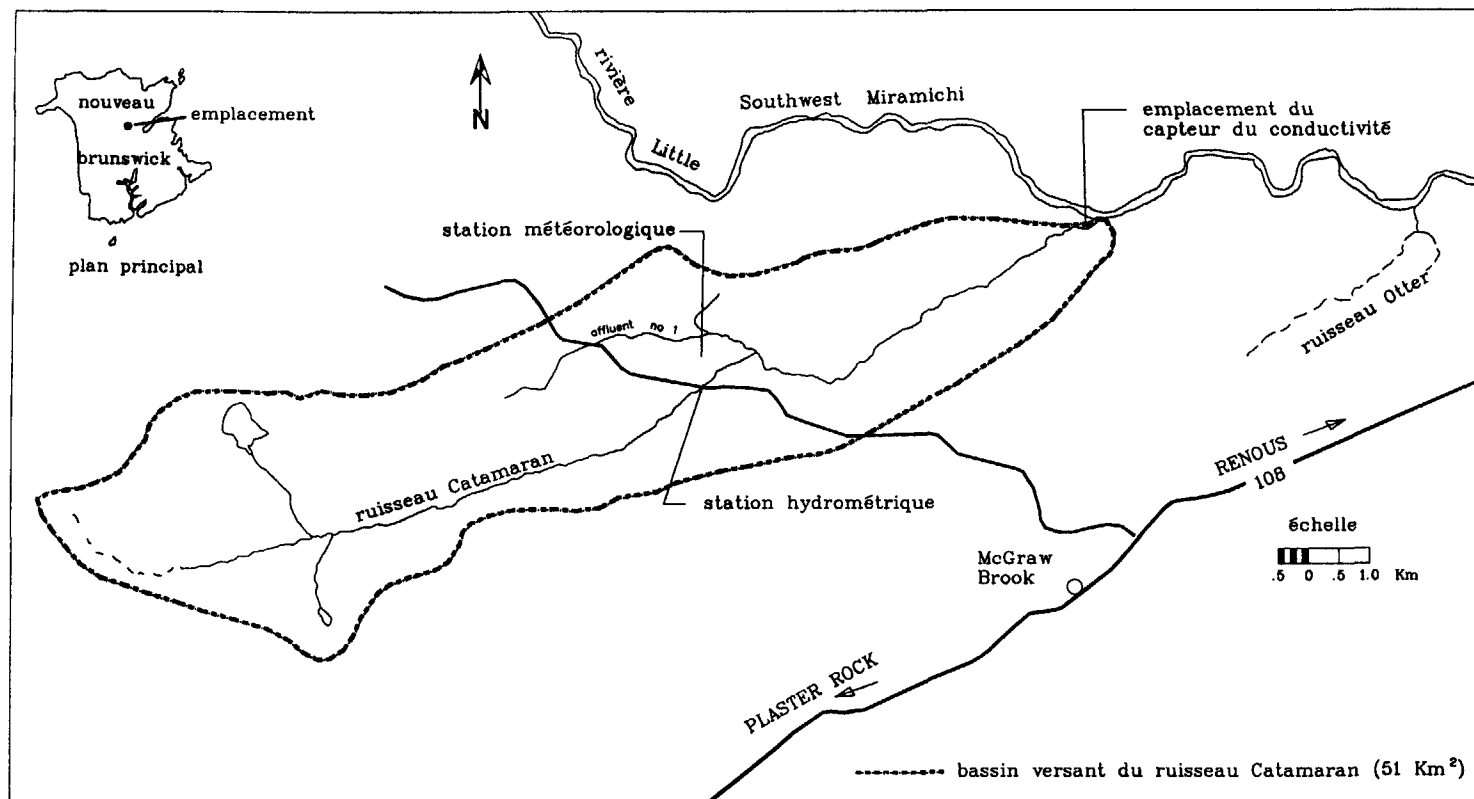


Figure 1 Bassin versant du ruisseau Catamaran et emplacement des stations hydrométéorologiques.
Catamaran Brook basin showing the location of the hydrometeorological stations.

dont les concentrations dépendent en grande partie de l'activité biologique du cours d'eau (HYNES, 1970). Étant donnée la diminution importante de l'activité biologique durant la saison avec glace, il apparaît important de vérifier la variation saisonnière des relations débit-COD et débit- N_{tot} . L'azote total a été inclus dans le calcul d'un index de nourriture de certains modèles d'habitat (JOWETT, 1992). D'autre part, les ions Na^+ et Mg^{2+} ont été choisis afin de vérifier si la relation entre le débit et les paramètres chimiques dont les concentrations sont peu influencées par l'activité biologique diffère entre la saison avec et sans glace.

4 – RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats des mesures de concentration des différents paramètres de qualité pendant la période sans glace pour les années 1990 à 1994 sont présentés au tableau 1. Les résultats pour la période avec glace apparaissent au tableau 2. Le carbone organique dissous présente une concentration durant la saison sans glace ($4,20 \text{ mg L}^{-1}$) supérieure à la concentration moyenne pendant la saison avec glace ($2,65 \text{ mg L}^{-1}$). Les concentrations d'azote total (N_{tot}) sont pour leur part plus élevées en saison avec glace (moyenne de $0,185 \text{ mg L}^{-1}$) qu'en saison sans glace (moyenne de $0,129 \text{ mg L}^{-1}$). Le pH a une valeur moyenne légèrement

Tableau 1 Statistiques générales des paramètres chimiques du ruisseau Catamaran ; période estivale (sans glace, de mai à décembre) de 1990 à 1994.

Table 1 General statistics on chemical parameters at Catamaran Brook; summer period (ice-free, May to December) from 1990 to 1994.

| | Q m^3/s | CND $\mu\text{S cm}^{-1}$ | COD mg l^{-1} | Ntot mg l^{-1} | pH unité pH | Na mg l^{-1} | Mg mg l^{-1} |
|------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|
| n | 78 | 78 | 70 | 72 | 75 | 75 | 75 |
| min. | 0,059 | 25 | 1,3 | 0,06 | 6,8 | 0,90 | 0,84 |
| max. | 5,76 | 77 | 13,3 | 0,29 | 7,7 | 2,1 | 3,3 |
| moyenne | 1,10 | 50,9 | 4,2 | 0,129 | 7,33 | 1,46 | 1,83 |
| écart-type | 1,06 | 13,8 | 2,48 | 0,048 | 0,239 | 0,298 | 0,592 |

Tableau 2 Statistiques générales des paramètres chimiques du ruisseau Catamaran ; période hivernale (avec glace, de janvier à avril) de 1990 à 1994.

Table 2 General statistics on chemical parameters at Catamaran Brook; winter period (ice-covered, January to April) from 1990 to 1994.

| | Q m^3/s | CND $\mu\text{S cm}^{-1}$ | COD mg l^{-1} | Ntot mg l^{-1} | pH unité pH | Na mg l^{-1} | Mg mg l^{-1} |
|------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|
| n | 15 | 15 | 12 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| min. | 0,156 | 28 | 1,5 | 0,08 | 6,8 | 0,89 | 0,89 |
| max. | 5,68 | 70 | 4,3 | 0,31 | 7,6 | 2,0 | 2,7 |
| moyenne | 1,32 | 52,3 | 2,65 | 0,185 | 7,24 | 1,51 | 1,85 |
| écart-type | 1,75 | 14,2 | 1,00 | 0,056 | 0,256 | 0,365 | 0,597 |

plus élevée en saison sans glace (7,33) qu'en saison hivernale (7,24). Le magnésium Mg^{2+} et le sodium Na^+ démontrent des concentrations moyennes similaires pendant les deux saisons. La concentration moyenne de Mg^{2+} en hiver est de $1,85 \text{ mg L}^{-1}$ contre $1,83 \text{ mg L}^{-1}$ l'autre saison. La concentration moyenne de Na^+ est de $1,51 \text{ mg L}^{-1}$ en saison hivernale et de $1,46 \text{ mg L}^{-1}$ durant la saison sans glace.

Les relations entre le débit et les différents paramètres chimiques sont présentées à la figure 2. La relation pour chaque paramètre indique le degré de dépendance par rapport au débit. L'allure des distributions semble justifier l'établissement d'une relation mathématique entre la plupart des variables chimiques et le débit. Pour ce faire, trois modèles de régression ont été étudiés, soit un pour la série complète de données, ainsi que pour les périodes avec et sans couvert

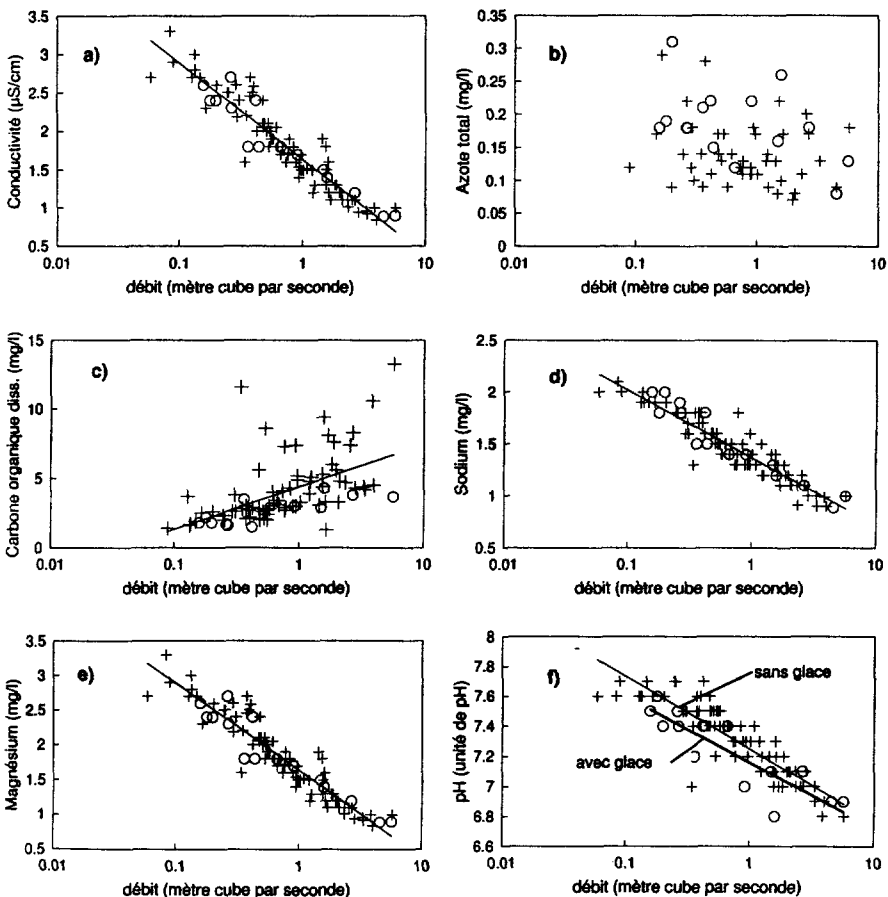


Figure 2 Relation entre le débit et les paramètres chimiques au ruisseau Catamaran par saison. (+) représente les données en période sans glace et (o) en période avec glace.

Seasonal relation of chemical parameters with discharge at Catamaran Brook. (+) represents data during the season with no ice cover and (o) data during the ice-covered period.

de glace (figure 2 et tableau 3). Les équations calculées pour chacun des paramètres avec le coefficient de détermination, r^2 , et l'écart-type, démontrent une très bonne relation pour la plupart des paramètres (tableau 3). Par contre, de faibles relations ont été notées entre le débit et les paramètres influencés par l'activité biologique (N_{tot} et COD). Ainsi, les coefficients de détermination calculés dans le cas de l'azote total dissous (N_{tot}) étaient non-significatifs et inférieurs à 0,212. Les coefficients de détermination pour le carbone organique dissous étaient significatifs ($P < 0,01$), mais relativement plus faibles que ceux des autres paramètres. Ces derniers (pH, conductivité, Na^+ et Mg^{2+}) ont tous démontré des relations négatives avec le logarithme du débit, et un coefficient de détermination supérieur à 0,75 dans tous les cas. Les résultats de la présente étude indiquent des r^2 supérieurs à ceux observés par FELLER et KIMMINS (1979) pour le pH, la conductivité, et les ions Na^+ et Mg^{2+} . TAYLOR *et al.* (1993) ont calculé des coefficients de détermination entre le débit et les solides dissous totaux dans Marmott Creek (Saskatchewan, Canada) variant entre 0,02 en hiver et 0,65 durant la saison sans glace. Ils ont expliqué les différences saisonnières par le fait que la majorité de la charge en solides dissous est transportée durant la saison sans glace alors qu'il y a un plus grand lessivage du bassin versant. La saison avec glace survient aussi en temps d'étiage, ce qui limite la vitesse d'écoulement. Cependant, le nombre d'échantillons pris durant la saison sans glace était dix fois supérieur à celui pris durant la saison avec glace.

Tableau 3 Relation entre le débit et les paramètres chimiques au ruisseau Catamaran de 1990 à 1994.

Table 3 Chemical-discharge relations of different parameters at Catamaran Brook from 1990 to 1994.

| Saison | Équations | s | r^2 |
|------------------|--|-------|----------|
| CND | été CND = $-30,79 \log(Q) + 46,46$ | 1,19 | 0,898*** |
| | hiver CND = $-26,52 \log(Q) + 47,71$ | 2,25 | 0,915*** |
| | combiné CND = $-29,91 \log(Q) + 46,68$ | 1,06 | 0,898*** |
| COD | été COD = $3,35 \log(Q) + 4,62$ | 0,621 | 0,300*** |
| | hiver COD = $1,54 \log(Q) + 3,00$ | 0,378 | 0,622** |
| | combiné COD = $3,07 \log(Q) + 4,40$ | 0,632 | 0,294*** |
| N_{Tot} | été $N_{\text{Tot}} = 0,016 \log(Q) + 0,132$ | 0,013 | 0,022 |
| | hiver $N_{\text{Tot}} = -0,051 \log(Q) + 0,176$ | 0,027 | 0,212 |
| | combiné $N_{\text{Tot}} = 0,001 \log(Q) + 0,139$ | 0,013 | 0,000 |
| pH | été pH = $-0,485 \log(Q) + 7,25$ | 0,031 | 0,774*** |
| | hiver pH = $-0,437 \log(Q) + 7,16$ | 0,067 | 0,766*** |
| | combiné pH = $-0,473 \log(Q) + 7,24$ | 0,029 | 0,752*** |
| Na | été Na = $-0,642 \log(Q) + 1,37$ | 0,029 | 0,870*** |
| | hiver Na = $-0,681 \log(Q) + 1,39$ | 0,057 | 0,916*** |
| | combiné Na = $-0,650 \log(Q) + 1,37$ | 0,026 | 0,879*** |
| Mg | été Mg = $-1,28 \log(Q) + 1,64$ | 0,055 | 0,881*** |
| | hiver Mg = $-1,11 \log(Q) + 1,66$ | 0,099 | 0,905*** |
| | combiné Mg = $-1,25 \log(Q) + 1,64$ | 0,049 | 0,882*** |

s erreur-type de la régression.

* significatif à $p < 0,05$.

** significatif à $p < 0,01$.

*** significatif à $p < 0,0001$.

Une analyse a été effectuée pour déterminer la pertinence de définir un seul modèle ou deux modèles sur une base saisonnière. La fonction de répartition de Fisher a été utilisée pour tester l'hypothèse de base (H_0) à un seuil de confiance de 95 % ($\alpha = 0,05$), en utilisant l'équation 2. Les résultats démontrent que le pH doit être représenté par deux modèles saisonniers tandis que les autres paramètres (CND, COD, Na^+ et Mg^{2+}) ne démontrent pas de différences significatives par saison (tableau 4). Le N_{tot} fut exclu de l'analyse parce que les coefficients de détermination de la régression étaient non-significatifs. Les variations des concentrations de NO_3 ont été étudiées sur un petit bassin versant régularisé de la Norvège (BAEKKEN *et al.* 1981). Aucune relation significative n'a été observée en période estivale mais une relation négative a été calculée pour les données d'hiver ($r^2 = 0,46$). De même, HILL (1986) a remarqué de fortes différences saisonnières dans les concentrations de NO_3 sur la rivière Nottawasaga (Ontario, Canada). Les fluctuations de l'azote total semblent plutôt liées aux variations de la production primaire et secondaire du cours d'eau (BAEKKEN *et al.* 1981). Bien que la pertinence de deux modèles fut infirmée par l'analyse statistique pour le COD, le tableau 4 montre que ce paramètre se trouve presque à la limite de la nécessité de différencier entre les deux saisons (rapport calculé de 3,04 comparativement au rapport critique de 3,08).

Tableau 4 Analyse saisonnière de variance des paramètres chimiques du ruisseau Catamaran pour un seuil de confiance de 95 % (i.e. $\alpha = 0,05$).

Table 4 Analysis of seasonal variance of chemical parameters at Catamaran Brook for a significance level of 95 % ($\alpha = 0.05$).

| Paramètre | Holder ¹ | Fisher ² | H_0 |
|-----------|---------------------|---------------------|-----------|
| CND | 1,45 | 3,09 | 1 modèle |
| COD | 3,04 | 3,09 | 1 modèle |
| pH | 4,54 | 3,09 | 2 modèles |
| Na | 0,64 | 3,09 | 1 modèle |
| Mg | 1,04 | 3,09 | 1 modèle |

1. Rapport de Holder calculé selon l'équation 2 (Holder 1985).

2. Probabilité de Fischer ($F_{p, n-k-1, 1-\alpha}$)

Les résultats de l'analyse ne démontrent aucune différence saisonnière pour les ions Na^+ et du Mg^{2+} (figures 2d et 2e). Ces ions sont principalement contrôlés par la géologie, c'est-à-dire que leur concentration dépend principalement du contact eau-sol (dilution et lessivage). Les apports atmosphériques et l'activité biologique influencent peu ces variables. C'est aussi le cas de la conductivité (figure 2a), qui représente une mesure indirecte de tous les ions dissous. BAEKKEN *et al.* (1981) notèrent une variation saisonnière dans les concentrations de Na^+ et Mg^{2+} et de conductivité de la rivière Esko en Norvège. Les conclusions différentes sur ces deux plans d'eau démontrent bien la nécessité de tester tout modèle de régression sur une base saisonnière, au mois pour les bassins versants situés dans les régions nordiques.

Des mesures de conductivité sont prises sur une base horaire au ruisseau Catamaran. La figure 3 montre la série chronologique des moyennes journalières de conductivité mesurée à l'embouchure du ruisseau pour 1993, ainsi que les

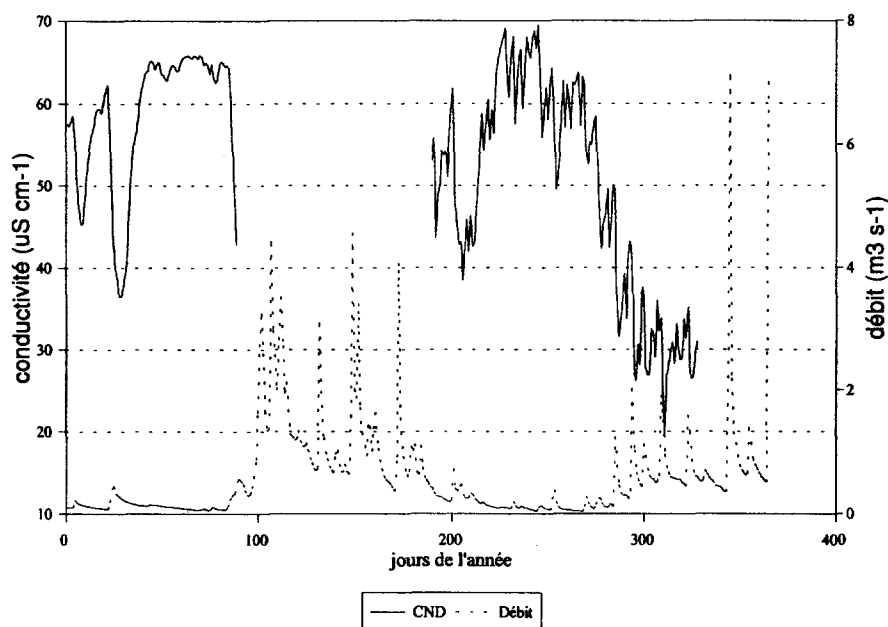


Figure 3 Variation de la conductivité et du débit au ruisseau Catamaran en 1993.
Variability of conductivity and discharge at Catamaran Brook in 1993.

débits journaliers pour cette même période. Il existe peu d'événements hydrologiques comparables entre l'hiver et l'été. Les événements les plus similaires se sont produits entre le 23 janvier et le 5 février (jours 23 à 34) et du 18 au 30 juillet (jours 199 à 211). Une fonte qui a eu lieu entre le 23 janvier et le 5 février a fait augmenter le débit de $0,08 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ à $0,46 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en 4 jours (augmentation relative par un facteur de 5,75). La conductivité minimale a été mesurée le 30 janvier ($37,3 \text{ uS cm}^{-1}$), 5 jours après la crue. Une augmentation de débit de l'ordre de $0,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a produit à cette occasion une baisse de conductivité de 20 uS cm^{-1} (dilution relative de 1,5). L'événement du mois de juillet (jours 199 à 211) a fait subitement augmenter le débit de $0,19 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ à $0,73 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (débit 3,8 fois plus élevé). La dilution des solutés qui s'en suivit a fait baisser la conductivité de $61,9$ à $38,4 \text{ uS cm}^{-1}$ (dilution relative de 1,6), soit une diminution de $23,5 \text{ uS cm}^{-1}$ associée à une augmentation du débit de $0,54 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Comme dans le cas de l'événement en saison avec glace, la valeur minimale de conductivité a été mesurée 5 jours après le débit maximum. La seule différence importante entre ces deux événements est le déphasage qui s'est produit en juillet, au début de la crue. La baisse de la conductivité a été précédée d'une augmentation de celle-ci (de $56,4$ à $61,9 \text{ uS cm}^{-1}$ entre le 18 et le 20 juillet). Cette augmentation peut être causée par un écoulement plus important d'eau souterraine, plus chargée en ions solubles, au début de la crue.

L'analyse des données de pH montre que deux modèles sont nécessaires pour représenter la relation débit-pH (figure 2f). Ce résultat est en accord avec d'autres études sur la relation entre l'acidité et le débit sur d'autres bassins versants. Ainsi, une étude en Norvège a démontré le même type de relation géné-

rale entre ces deux variables (DAMSLETH, 1986). L'analyse des résidus d'un modèle stochastique développé par DAMSLETH (1986) montre une différence significative entre les moyennes des résidus de chacune des saisons. WELS *et al.* (1988) ont tenté d'établir des relations débit-pH pour deux petits cours d'eau sur le bouclier canadien, durant la période de fonte des neiges. Les concentrations d'ions H^+ avaient de faibles corrélations avec le débit pour cette période. Le phénomène du choc acide associé à la fonte des neiges est une des raisons possibles pour expliquer cette différence. Les augmentations de débit en hiver sont, dans la plupart des cas, associés à la fonte. Le pH de la neige étant souvent inférieur à celui des précipitations liquides (CAMPBELL *et al.*, 1992), il en résulte une baisse relativement plus importante du pH lors de la fonte. PETERS et DRISCOLL (1987) ont étudié la composition chimique de la précipitation et du couvert neigeux à un site boisé du centre-ouest des Monts Adirondack. Ils ont remarqué que les solutés (solides dissous et ions H^+) dans la neige étaient relâchés surtout en début de fonte, avec des concentrations plus élevées d'ions H^+ vers la fin de l'hiver. Ces observations corroborent les mesures de pH généralement plus faibles mesurées en hiver sur le ruisseau Catamaran. Il est important de noter que les processus géochimiques affectant les ions H^+ du couvert neigeux sont plus complexes que ceux reliés à d'autres cations (JONES *et al.*, 1986) et que ces mécanismes sont plus difficiles à modéliser par une relation débit-concentration.

5 – IMPLICATION AU NIVEAU DES ÉTUDES ÉCOSYSTÉMIQUES

Malgré le fait que les données sur les densités de poissons ne sont pas disponibles en période hivernale au ruisseau Catamaran, il est possible d'analyser nos résultats en fonction des répercussions d'une variation saisonnière sur l'habitat aquatique. En effet, CUNJAK (1996) a expliqué que le choix de l'habitat d'hiver pour les salmonidés est régi par le besoin de minimiser les dépenses énergétiques. Les conditions adverses nécessitant une dépense accrue d'énergie incluent certaines variables de qualité de l'eau. Dans le cas du ruisseau Catamaran comme pour beaucoup d'autres cours d'eau, le pH constitue une variable importante pouvant influencer les habitats aquatiques, surtout lors de fontes importantes du couvert nival en hiver. Le pH est alors plus faible que pour un débit équivalent en été (*figure 2f*). Les conditions de faible pH au printemps et durant les fontes hivernales peuvent influencer (négativement) la survie des œufs et alevins des salmonidés (LACROIX, 1985). De plus, durant une période de faible pH d'autres métaux lourds tels que l'aluminium (Al) peuvent devenir toxiques pour ces poissons (CAMPBELL *et al.*, 1992). KORMAN *et al.* (1994) observèrent que la baisse du pH était responsable de la diminution de 41 % dans la population de saumons de la rivière LaHave en Nouvelle-Écosse (Canada). Ces résultats sont similaires à ceux de WATT (1986) qui a étudié aussi les diminutions dans les populations de saumon dues à l'acidité dans les rivières de la Nouvelle-Écosse.

KOMADINA-DOUTHWRIGHT *et al.* (1997) ont étudié les mouvements de saumons en relation avec les changements d'habitats causés par la glace sur les tributaires de la rivière Miramichi (Nouveau-Brunswick, Canada). Ces poissons ont démontré une préférence pour des sites hivernaux situés en aval de la limite de la marée. Les aires d'hivernation étant situées plus en aval, ces saumons sont sou-

mis au gradient spatial de la qualité de l'eau. La proximité du milieu estuarien risque d'amener aussi des variations saisonnières différentes que celles trouvées en amont pour de nombreux paramètres de qualité de l'eau. L'étude sur la rivière Miramichi a démontré que les déplacements des individus n'ont pas été affectés par une période de fonte de neige observée durant l'hiver. Il est possible que l'acidité de la neige fondue soit tamponnée par l'eau saumâtre en aval.

Les modèles de gestion de l'habitat, ainsi que les modèles biologiques tels que celui de KORMAN *et al.* (1994) sont souvent appliqués en fonction d'une série temporelle de données physico-chimiques incomplète, l'hiver étant habituellement exclue pour des raisons logistiques. Les conclusions tirées de ces modèles sont donc limitées. CUNJAK (1996) a énuméré les critères généraux de sélection d'habitat hivernaux pour les poissons. Selon ces critères, la protection contre les conditions physico-chimiques difficiles vient en premier lieu, d'où l'importance d'acquiescer des outils de gestion bien modulés aux changements saisonniers. HALL (1990), de son côté, a établi que les variations saisonnières de calcium (Ca), de carbone organique dissout (COD) et d'aluminium (Al) sur un cours d'eau du sud de l'Ontario influencent la distribution des invertébrés benthiques. Une augmentation de la dérive à l'automne était causée en grande partie par les variations des concentrations de calcium Ca et de COD. Bien que les données du ruisseau Catamaran n'ont pas démontrées de variations saisonnières significatives pour le Ca et le COD (tableau 4), ces variations saisonnières existent sur d'autres cours d'eau. Les résultats de notre exercice statistique démontrent clairement que l'inclusion de certaines données de qualité de l'eau telles que le pH dans ces modèles ne peut se faire sans une vérification préalable des variations saisonnières. Une fois cette vérification faite, les relations débit-concentration permettent d'élargir la portée des modèles qui incluent des critères physico-chimiques à toute l'année.

Il est important de situer cette information dans le contexte des changements à venir sur le ruisseau Catamaran. Les modèles mathématiques décrits ci-haut risquent d'être modifiés après le début des activités de coupe, à l'automne 1996. D'autres études, comme celle de WILLIAMS *et al.* (1987), ont démontré qu'on observe souvent une augmentation des concentrations d'ions dissous et de matières en suspension après la coupe. HORNING *et al.* (1987) et LIKENS *et al.* (1985) ont observé des baisses significatives du pH après la coupe forestière sur de petits bassins versants. Les relations débit-concentration établies dans cette étude et leurs variations saisonnières devront donc être révisées durant et après la coupe, ce qui démontre encore une fois les limites inhérentes à cette approche.

6 – CONCLUSION

Dans la plupart des études d'écosystèmes aquatiques, il est important d'étudier les relations entre les paramètres chimiques et le régime hydrologique (débit). Une analyse des données de qualité d'eau sur le bassin versant du ruisseau Catamaran a permis de définir les différentes relations débit-concentrations pour cinq paramètres chimiques (conductivité, pH, Mg^{2+} , N_{tot} , COD et Na^+). Les ions Na^+ et Mg^{2+} , ainsi que la conductivité réagissent pour leur part de la même façon durant toute l'année, établissant une relation linéaire négative avec le loga-

rythme du débit. Le carbone organique total est relié positivement au logarithme du débit, quoique de façon moins marquée. Seul le pH requiert un modèle mathématique différent en été et en hiver.

La saine gestion des habitats doit inclure une connaissance des variations des paramètres de qualité de l'eau. Les résultats de l'analyse statistique sur le ruisseau Catamaran démontrent que de simples relations statistiques peuvent être utilisées afin de révéler ces relations phénoménologiques dans la mesure où les variables étudiées sont liées à des processus géochimiques peu complexes. Dans le cas de processus géochimiques plus complexes, l'application de ces équations de régression sur une base annuelle peut s'avérer erronée, tel qu'il fut démontrée par le cas du pH sur le ruisseau Catamaran. Cependant, ces relations peuvent quand même être appliquées initialement comme premier test si l'année hydrologique est divisée en saisons durant lesquelles les processus géochimiques hydrologiques sont relativement homogènes.

Étant donnée qu'une modélisation géochimique déterministe peut s'avérer ardue et exige une quantité de données souvent non-disponible, les gestionnaires et scientifiques continueront probablement à utiliser de simples relations débit-concentration telles que celles présentées ici. Il devient alors important d'appliquer les tests statistiques simples que nous avons décrits ci-haut pour minimiser le risque de prédiction erronée.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier P. Hardie pour la récolte des échantillons, J. Conlon pour son aide dans la conception de certaines figures et M. St-Hilaire pour ses suggestions. Ce travail a été financé en partie par l'Entente de coopération Québec – Nouveau-Brunswick, il représente la contribution n° 34 du projet n° 34 du projet de recherche sur l'habitat au ruisseau Catamaran.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASHKAR F., EL-JABI N., OUARDA T., 1993. Étude des variations saisonnières des crues par le modèle de dépassement. *Revue des Sciences de l'Eau*, 6, 131-152.
- BAEKKEN T., FJELHEIM A., LARSEN R., 1981. Seasonal fluctuations of physical and chemical parameters of a weir basin in a regulated West Norwegian river. *Nordic Hydrology*, 12, 31-42.
- BENSON N.G., 1953. The importance of ground water to trout populations in the Pigeon River, Michigan, *Transactions of the eighteenth North American Wildlife Conference*, March 9, 10 and 11, 1953, Washington, D.C. pp. 269-281.
- CAISSIE D., 1995. Ecological implications of streamflow variability and chemical composition: The Catamaran Brook (New-Brunswick) Experience. *Actes de la 48^e Conférence Annuelle de l'ACRH, Fredericton, N.-B.* 20-23 juin. pp. 351-370.
- CAISSIE D., POLLOCK T.L., CUNJAK R.A., 1996. Variations in stream water chemistry and hydrograph separation in a small drainage basin. *Journal of Hydrology*, 178: 137-157.

- CAMPBELL P.G.C., HANSEN H.J., DUBREUIL B., NELSON W.O., 1992. Geochemistry of Quebec North Shore salmon rivers during snowmelt: organic acid pulse and aluminum mobilization, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49: 1938-1952.
- CLUIS D., LANGIS R., COUTURE P., 1988. Contribution durant des épisodes hydrologiques extrêmes des apports atmosphériques et souterrains en ions majeurs à la qualité des eaux de surface. *Atmosphere-Ocean*, 26, 3 : 437-448.
- CHRISTOPHERSEN N., NEAL C., 1990. Linking hydrological, geochemical and soil chemical processes on the catchment scale: An interplay between modeling and field work. *Water Resources Research*, 26, 12: 3077-3086.
- CUNJAK R.A., CAISSIE D., EL-JABI N., 1990. *Projet de recherche sur l'habitat du ruisseau Catamaran : description et champs d'étude générale*. Rapport technique canadien des sciences. halieutiques et aquatiques 1751, 15 p.
- CUNJAK R.A., CAISSIE D., EL-JABI N., HARDIE P., CONLON J.H., POLLOCK T.L., GIBERSON D.J., KOMADINA-DOUTHWRIGHT S., 1993. *The Catamaran Brook New-Brunswick Habitat Research Project: Biological, Physical and Chemical Conditions 1990-1992*. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences, 1914, 81 p.
- CUNJAK R.A., 1996. Winter habitat of selected stream fishes and potential impacts from land-use activity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 53: 267-282.
- DALZIEL T., BROWN D., 1986. The effects of low pH, low calcium concentrations and elevated aluminium concentrations on sodium fluxes in brown trout (*Salmo trutta* L.). *Water Air and Soil Pollution*, Volume 30, 569-577.
- DAMSLETH E., 1986. Modeling river acidity – A transfer Function Approach. Dans: *Statistical Aspects of Water Quality Monitoring*. Proceedings of the Workshop held at the Canada Center for Inland Waters.
- DOCKRAY J.J., REID S.D., WOOD C.M., 1996. Effects of elevated summer temperature and reduced pH on metabolism and growth of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) on unlimited ration. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53: 2752-2763.
- EDWARDS R.W., DENSEM J.W., RUSSELL P.A., 1979. An assesment of the importance of temperature as a factor controlling the growth rate of brown trout in streams. *Journal of Animal Ecology*, 48: 501-507.
- ESTERBY S.R., EL-SHAARAWI, 1992. Detection of water quality changes along a river system. *Environmental Monitoring and Assesment*, 23, 219-242.
- FELLER M.C., KIMMINS J.P., 1979. Chemical characteristics of a small stream near Haney in Southwestern British Colombia. *Water Resource Research*, 15, 247-258.
- HALL R., 1990. Relative importance of seasonal, short term, pH disturbances during discharge variation on a stream ecosystem. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 47: 2261-2274.
- HARVEY H., WHELPDALE D., 1986. On the prediction of acid precipitation events and their effects on fish. *Water, air and soil Pollution*, 30: 545-552.
- HILL A.R., 1986. Stream nitrate-N loads in relation to variations in annual and seasonal runoff regimes. *Water Resource Bulletin*, 22: 829-839.
- HIRATA T., MURAOKA K., 1988. Seasonal change of streamwater chemistry in Tsukuba experimental forested land. *Japanese Journal of Limnology*, 49: 1-9.
- HOLDER R.L., 1985. *Multiple regression in Hydrology*. Institute of Hydrology, Wallingford, England, 147 p.
- HORNUNG M., REYNOLDS B., STEVENS P.A., NEAL C., 1987. Stream acidification resulting from afforestation in the UK: evaluation of causes and possible ameliorative measures. Dans: *Hydrologie forestière et aménagement des bassins hydrologiques*, Actes du colloque de Vancouver, août 1987, AISH publ. no. 167, 65-74.
- HYNES T., 1970. *The ecology of running waters*. University of Toronto Press, 541 p.
- JONES G. W., SOCHANSKA J., STEIN J., ROBERGE, PLAMONDON A.P., 1986. Snowmelt in a boreal forest site: an integrated model of meltwater quality (SNOQUAL1). *Air, Water and Soil Pollution* 31: 431-439.

- JOWETT I.G., 1992. Models of the abundance of large brown trout in New-Zealand rivers. *North American Journal of Fisheries Management* 12: 417-432.
- KOMADINA-DOUTHWRIGHT S.M., CAISSIE D., CUNJAK R.A., 1997. Winter-movement of radio-tagged Atlantic salmon (*Salmo salar*) kelts in relation to frazil ice in pools of the Miramichi River. *Rapp. Tech. Sci. Halieut. Aquat.* 2161: 66 p.
- KORMAN J., MARMOREK D.R., LACROIX G.L., AMIRO P. G., RITTER J.A., WATT W.D., CUTTING R.E., ROBINSON D.C.E., 1994. Development and evaluation of a biological model to assess regional-scale effects of acidification on Atlantic Salmon (*Salmo Salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 51: 662-680.
- LACROIX G.L., 1985. Survival of eggs and alevins of Atlantic Salmon (*Salmo Salar*) in relation to the chemistry of interstitial water in redds in some acidic streams of Atlantic Canada. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*: 42: 292-299.
- LIKENS G.E., BORMANN H., PIERCE R., DRISCOLL C., EATON J., 1985. The Hubbard Brook Valley. Dans: *An ecosystem Approach to aquatic ecology*, G. Likens éditeur, Springer-Verlag, 9-39.
- MORIN G., PAQUET P., 1995. *Le modèle de simulation de quantité et qualité CEQUEAU, Guide de l'utilisateur. Version 2.0 pour Windows. INRS-EAU, rapport de recherche n° 435, 54 p.*
- PETERS N., DRISCOLL C., 1987. Sources of acidity during snowmelt at a forested site in the west-central Adirondack Mountains, New-York. Dans: *Forest Hydrology and Watershed Management*, Actes du colloque de Vancouver, août 1987: AISH publ. no. 167, 99-108.
- RICE K., BRICKER O., 1995. Seasonal cycles of dissolved constituents in streamwater in 2 forested catchments in the mid-Atlantic region of the eastern USA. *Journal of Hydrology*, 170: 137-158.
- SCHALLOCK E., LOTSPEICH F., 1974. Low winter dissolved oxygen in some Alaskan rivers. *EPA Report No EPA-660/3-74-008*, 33 p. 11 fig. 3 tab.
- ST-HILAIRE A., CAISSIE D., CLUIS D., QUENTIN M.E., 1996. *Application d'un système d'information géographique sur un petit bassin versant forestier*. *Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat.* 2086: 41 p.
- TAYLOR B., HAMILTON H., MACDONALD G., 1993. Total solutes and geochemical yields in the Saskatchewan river basin. *Water Resource Bulletin*, 29: 235-247.
- WATT W.D., 1986. A summary of the impact of acid rain on Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Canada. *Water, Air and Soil Pollution*, 35: 27-35.
- WELS C., CORNETT R.J., LaZERTE B.D., DILLON P.J., 1988. Changes in stream chemistry during snowmelt runoff in two headwater catchments. Dans *Proceedings of the Annual Snow Conference*, J Lewis (éd.), p. 60-73.
- WILLIAMS A.G., TERNAN J.L., KENT M., 1987. The impact of conifer afforestation on water quality in an upland catchment in southwest England. Dans: *Hydrologie forestière et aménagement des bassins hydrologiques*, Actes du colloque de Vancouver, août 1987, AISH publ. no. 167, 451-464.